

# 論文 コンクリート床版の損傷評価を目的としたAEトモグラフィ法の効率的な弾性波励起方法に関する研究

奥出 信博<sup>\*1,2</sup>・麻植 久史<sup>\*3</sup>・塩谷 智基<sup>\*4</sup>・西田 孝弘<sup>\*3</sup>

**要旨** : AEトモグラフィ法において, より効率的な弾性波の入手法の提案を目的とし, コンクリート床版を対象とした計測において, 鋼球打撃とステンレスチェーンを用いた入手法の特徴を分析した。得られた弾性波の最大振幅値や卓越周波数, 初動の明瞭さ等の特徴を把握するとともに, 良好なAEトモグラフィ結果を得るためのフィルタリング処理の方法についても検討を行った。ステンレスチェーンを用いた入手法は, 波の初動の明瞭さによるフィルター処理により鋼球打撃と同等の入手法と成り得ることを確認した。

**キーワード** : AEトモグラフィ, コンクリート床版, 弾性波, ステンレスチェーン, 明瞭度

## 1. はじめに

高度成長期に建設されたインフラ構造物の一部では, 老朽化による変状が顕在化ははじめています。平成25年にはインフラの延命化と維持管理コストの削減を目的に, インフラ長寿命化計画が関係省庁においてとりまとめられました。さらに平成26年には道路法施行規則の改正により, 道路橋の定期点検として近接目視を義務付けるなど様々な対策が講じられてきた。しかしながら, システムの中核を担う点検・診断において技術者が不足していることや, 予算確保の面で課題が多く残っている。そのため, より効率的・効果的な診断手法の開発とその社会実装が強く求められている。これまで小林・塩谷らは, AE源を用い構造物内部のひび割れ等の損傷程度を効率的に可視化する非破壊検査手法「AEトモグラフィ法」を提案してきた<sup>1)</sup>。本技術は, 構造物に生じたひび割れや空隙等が, 見かけの弾性波速度を低下させるという性質を利用したものであり, その有用性についてはこれまで複数報告されている<sup>2),3)</sup>。実橋におけるコンクリート床版の損傷評価への適用も試みており, 主として交通荷重を用いた手法としてその成果も報告されている<sup>4)</sup>。この手法は床版の内部損傷の摩擦で励起されるAE源(二次AE)を利用するもので, 交通規制を伴わない実用性の高い手法である。しかしながら, 二次AEの発生位置・発生数が床版の損傷状況や交通量に依存するため, AE源の取得制御が困難な手法といえる。そこで本研究では, 弾性波を能動的に励起させる方法を別途検討することとした。弾性波の励起方法として, アスファルト面からの鋼球打撃, ステンレスチェーンによる引きずり(以下, 「チェーン引き」と記す)の2種類の励起方法を比較することと

した。チェーン引きは弾性波の発生効率の面で期待が持てること, また将来的に車両にチェーンを搭載し走行させるなど, 活用の発展性にも期待が持てることから選定し, その結果に注目することとした。交通荷重, 鋼球打撃, チェーン引きの特徴を表-1のとおり整理した。なお, 米国では床版上面のコンクリートの浮きを診断する方法として金属チェーンを用いた打音法が規格化されている<sup>5)</sup>。

表-1 弾性波の励起手法と特徴

励起方法	利点	欠点
交通荷重	・交通規制が不要 ・能動的な励起が不要	・AE源の制御(発信位置・時間)が困難
鋼球打撃	・安定した弾性波の励起	・連続的に弾性波を励起させるには工夫が必要
チェーン引き	・連続的な弾性波の励起 ・活用の発展性に期待	本研究で確認

## 2. 弾性波トモグラフィとAEトモグラフィ

既知座標から弾性波を発信し各センサまでの走時により対象領域の速度分布を求めるのが「弾性波トモグラフィ」である。これに対し「AEトモグラフィ」は未知座標において発生した弾性波の発信時刻と位置を推定するとともに対象領域の速度分布を求める方法である。AEトモグラフィの最大の特徴は, 波線追跡を利用した位置標定手法にある。図-1に波線追跡法の例を概念図として示す。受信点jから, 対象領域を有限要素に分割する全ての節点iに対し波線追跡を行い, 各節点への走時が最小となる経路において理論走時 $T_{ji}$ を得る。次いで $T_{ji}$ と受信点jにおける初動走時 $T_j$ の差より潜在的な推定発信時間を得る。これを受信数Nに対しそれぞれ行い, 最終的に推定発信時間の分散が最小となる節点を発信点と

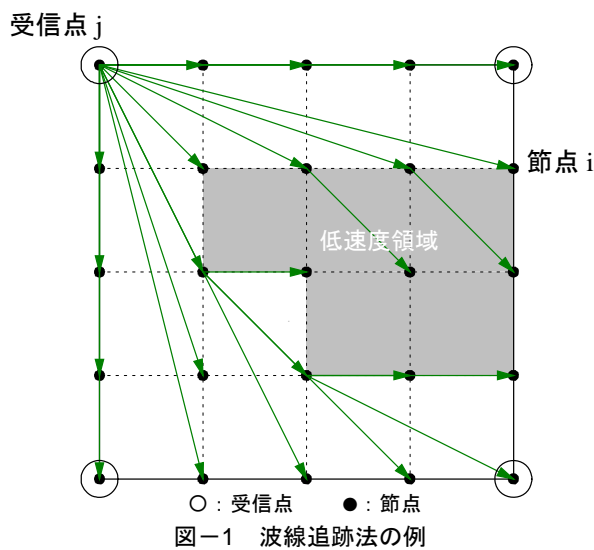
\*1 一般財団法人東海技術センター 事業統括本部 部門長 工修 (正会員)

\*2 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 インフラ先端技術共同研究講座 特任助教

\*3 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 インフラ先端技術共同研究講座 特定准教授 工博 (正会員)

\*4 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 インフラ先端技術共同研究講座 特定教授 工博 (正会員)

する。本手法を用いることにより、損傷を伴うような不均質材料でも優れた位置標定が可能となる。なお、弾性波トモグラフィは発生源の位置と発信時刻の推定を要しないため真に近い結果が期待できる。しながら道路橋等を対象とした場合、交通規制を伴うなど計測効率の面では課題が多い。一方の AE トモグラフィは発生源の位置と発信時刻の情報を必要としない解析手法であることから、実用面での期待が大きい。本研究では、AE トモグラフィにおける弾性波の入力手法の検討を目的としたが、その結果の妥当性については、真の値に近いと考えられる弾性波トモグラフィとの比較により判断することとした。



### 3. 計測対象と計測概要

計測対象は高速道路高架橋のコンクリート床版とした。橋梁の概要を表-2 に示す。床版にはガラスクロスが施されており、内部の床版コンクリートのひび割れ等状況を目視で確認することはできなかった。計測の対象範囲は、図-2 に示すとおり、追い越し車線側の 1.7m×1.5m の範囲とした。この範囲の床版を対象に、以下 a 及び b の計測を実施し結果の比較を行った。() 内は弾性波の発生に用いた項目を示す。

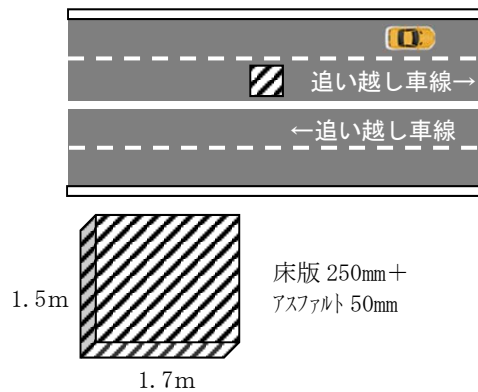
- a. 弾性波トモグラフィ (鋼球)
- b. AE トモグラフィ (鋼球・ステンレスチェーン)

既述のとおり「a. 弾性波トモグラフィ」は、既知座標から弾性波を発信し各センサまでの走時により対象領域の速度分布を求める。これに対し「b. AE トモグラフィ」は未知座標、つまりランダムに発生させた弾性波を用いて速度分布を求める方法である。「a. 弾性波トモグラフィ」の計測では直径 5mm の鋼球を用いて弾性波を発生させた。一方の「b. AE トモグラフィ」の計測では、a. と同じ鋼球を用いたほか、ステンレスチェーンを用いて弾性

波を発生させた。良好な AE トモグラフィ結果を得る手段としてチェーン引きが鋼球打撃と同等以上であるならば、車両にチェーンを搭載して引きずるなど、汎用性の観点からその活用の発展性に期待が高まる。

表-2 対象橋梁の概要

形式	鋼3径間連続非合成桁
橋長	75.8m
供用年数	40年
床版厚	250mm+アスファルト50mm
状態	床版下面にガラスクロスが貼付されており、ひび割れ等の様子は確認できない



### 4. 実験内容

計測は対象の追い越し車線のみ交通規制を行い実施した。「a. 弾性波トモグラフィ」、「b. AE トモグラフィ」における弾性波の記録はいずれも TEAC 製の加速度計測システム WX-7000SYR を用いて行った。センサは周波数応答が 3Hz~約 15kHz の圧電型加速度センサ (TEAC 製 707IS) を 9 個用いた。図-3 に解析モデルならびにセンサ配置を示す。解析モデルは対象領域を 16 要素に分割した 3 次元モデルとした。センサは床版の下面に金属治具 (15mm×15mm×5mm) を介して接着した。金属治具は床版下面に施されたガラスクロスをサンダーで除去後、露出したコンクリート表面にエポキシ樹脂により予め接着・固定した。計測内容は表-3 に示すとおりである。「a. 弾性波トモグラフィ」はアスファルト舗装面より、図-3 に示す 1~25 までの 25 点について直径 5mm の鋼球で打撃を行った。「b. AE トモグラフィ」の計測では、直径 5mm の鋼球、ステンレスチェーンの 2 種類の打撃アイテムを用い、それぞれアスファルト舗装面より 12 分間ランダムに打撃およびチェーン引きを行った。この際、弾性波の発生位置ができるだけ対象面に一様に分布するよう意識した。チェーン引きには図-4 に示すサイズのステンレスチェーンを用いた。チェーン引きは将来的に車両に搭載し走行しながら連続的に弾性波を発生させるなど交通

規制を要しない活用法を想定し、アスファルト舗装面を引きずるような動作により弾性波を発生させた。その様子を図-5に示した。

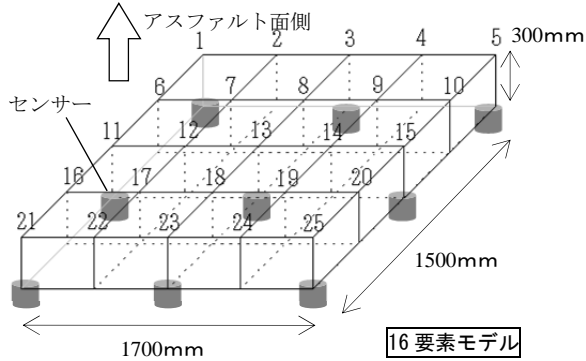


図-3 解析モデル

表-3 計測内容

計測手法	使用アイテム	弾性波発生要領
①弾性波トモグラフィ	鋼球(φ5mm)	既知座標 25点打撃
②AEトモグラフィ	鋼球(φ5mm)	12分間ランダム打撃
	ステンレスチェーン	12分間ランダムチェーン引き

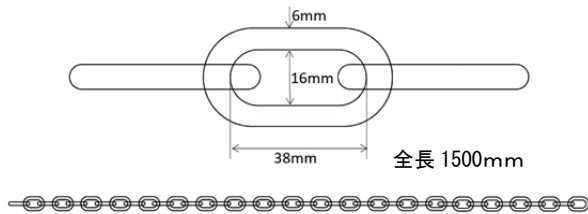


図-4 ステンレスチェーンの概要



図-5 チェーン引きの様子

## 5. 計測結果と考察

### 5.1 原波形

図-6に「b. AE トモグラフィ」の計測において、鋼球打撃およびチェーン引きで検出された原波形の一部（15秒間）を例示した。それぞれ横軸は時間、縦軸は出力電圧[V]を示す。鋼球打撃は打撃毎にシャープな出力が得られているのに対し、チェーン引きでは大小様々な波が混

在している。これら原波形はイベント（弾性波の発生源が共通の、位置標定を得るためのグループ）を抽出するための閾値（以下、「イベント抽出閾値」と呼ぶ）及び時間窓で処理を行った。なお、本計測において観測された定常的なノイズは最も高いセンサで約0.002Vであり、この値の2.5倍に相当する0.005Vをイベント抽出閾値とした。得られたイベント数は鋼球で415、チェーンで2539であった。

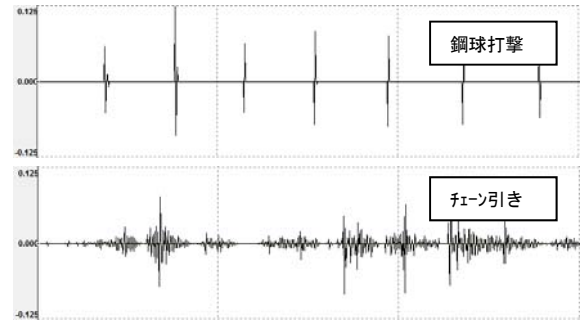


図-6 検出された弾性波の原波形

### 5.2 初動の読取り

対象床版の速度分布を求めるためには、得られた各波形から、そのP波到達時間を読み取る必要がある。この到達時間の読取り誤差は、最終的な速度分布の結果に大きな影響を与える。本研究では、波の到達時間を決定するため、式(1)で与えられる  $AIC_k$  を用いることとした<sup>6)</sup>。この手法はサンプルN個からなる振幅値  $X_i$  ( $i=1,2,\dots,N$ )の波形に対し、任意点kの前後の分散を比較する手法で、地震学やAEの分野で使用されている。式中の  $\text{var}(X[1,k])$  は振幅値  $X_1$  から  $X_k$  の分散であり、 $\text{var}(X[k,N])$  は  $X_k$  から  $X_N$  の分散である。

$$AIC_k = k \cdot \log\{\text{var}(X[1, k])\} + (N - k) \cdot \log\{\text{var}(X[k, N])\} \quad (1)$$

本手法では  $AIC_k$  が最小となる点を波の到達時間として決定するが、S/N比が低い場合には、図-7に例示するように  $AIC_k$  の最小値の読取り自体が困難となり、誤差を招く要因となり得る。ここで、P波の初動読み取りの信頼性パラメータとして式(2)に示す明瞭度が提案されている<sup>7)</sup>。

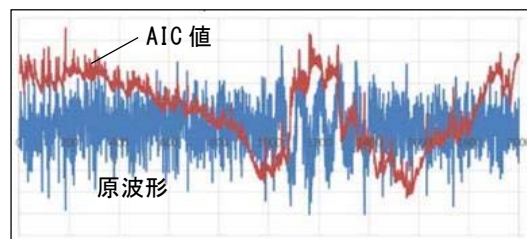


図-7 S/N比が低い場合のAIC

図-8に示すとおり、 $AIC(k_{min})$ はAICの最小値であり、 $AIC(k_{min} - \delta k)$ 、 $AIC(k_{min} + \delta k)$ はそれぞれ  $AIC(k_{min})$ からサンプル数  $\delta k$  (本研究では 100 とした) ずつ前後させた際の AIC の値を示す。

明瞭度 =

$$\frac{AIC(k_{min} - \delta k) + AIC(k_{min} + \delta k) - 2AIC(k_{min})}{(\delta k)^2} \quad (2)$$

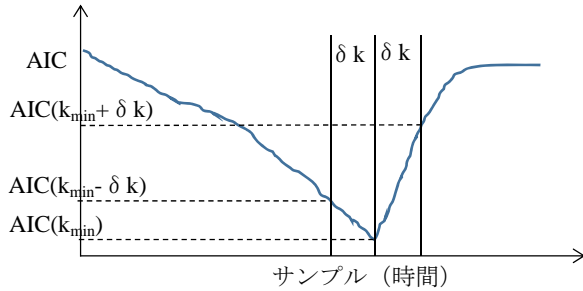


図-8 明瞭度の説明図

### 5.3 パラメータの比較

「b. AE トモグラフィ」の計測において、鋼球打撃、チェーン引きで検出された波の特徴を把握するため、得られた弾性波の最大振幅値、明瞭度、卓越周波数について比較を行った。ここでは、鋼球打撃、チェーン引きそれぞれランダムに抽出した 50 イベントを対象とした。この結果を図-9、図-10に示す。図-9より、鋼球打撃、チェーン引きともに最大振幅値と明瞭度との間には正の相関が見られる。鋼球打撃では最大振幅値、明瞭度ともに高い領域に分布しており、一定以上のイベント抽出閾値の設定により、低い明瞭度のイベントを排除できることが分かる。一方でチェーン引きでは最大振幅値、明瞭度ともに低い領域に分布しており相関も弱い。このため、チェーン引きでは、明瞭度の高い弾性波の抽出を期待し、イベント抽出閾値を高く設定した場合、極端にイベント数を減少させてしまう恐れがある。チェーン引きの場合、一定以上の明瞭度を有すイベントを多く確保したい場合は明瞭度そのものでフィルタリングすべきであると解釈できる。図-10より卓越周波数と明瞭度には相関は見られない。0kHz 付近の低周波に複数のプロットがみられる。本計測では、片側車線のみ規制を行い実施した。低周波数として示されたプロットは、未規制の走行車線側からの車両走行に伴う振動の可能性が考えられる。

### 5.4 弾性波トモグラフィの結果

図-11に弾性波トモグラフィの解析結果を示す。解析では破線で区画した 16 個の要素毎に速度値が得られる。本結果は、得られた速度は各要素の中心値として与え、最小曲率法による補間処理を実施した後、2次元画像として示した。結果より対象領域の大部分が 3500m/s 以上であることが分かる。弾性波速度は、密度、弾性係数、

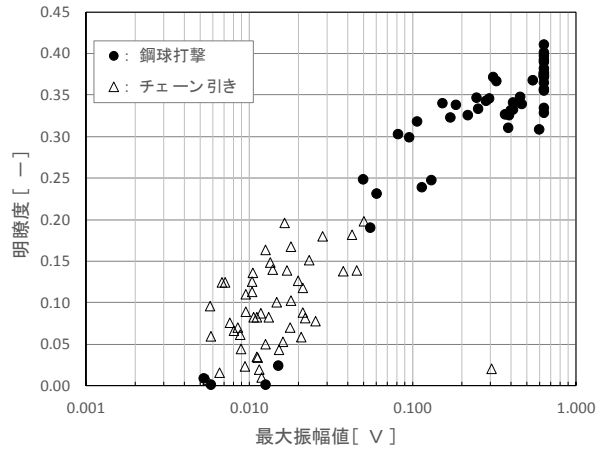


図-9 最大振幅値と明瞭度の関係

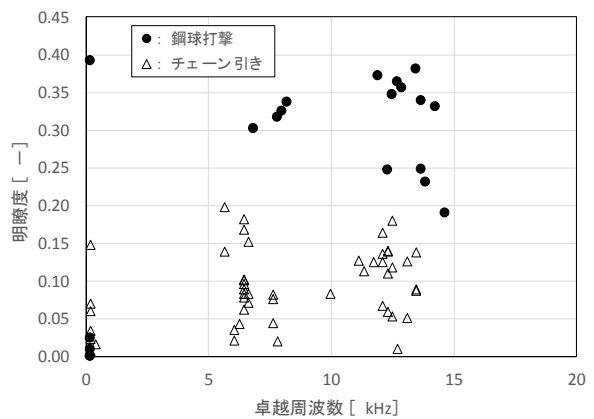


図-10 卓越周波数と明瞭度の関係

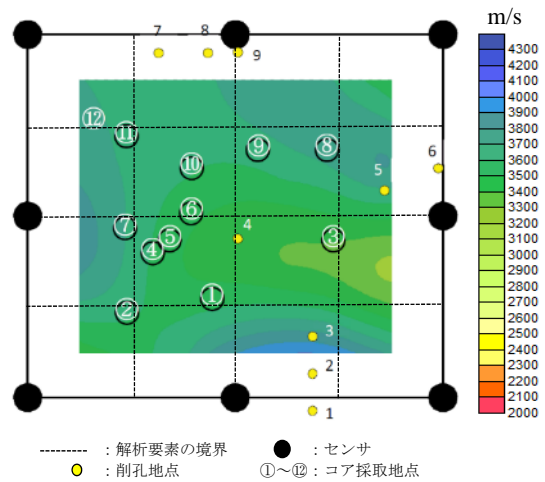


図-11 弾性波トモグラフィの結果

ポアソン比で決定され、損傷の伴わない一般的なコンクリートでは 3500m/s~4000m/s 程度を示す。このことから、本研究で対象としたコンクリート床版は全体的に健全であると評価できる。一方で、図には検証のため実施したドリル削孔地点とコア採取地点も併せて示している。検証の結果、削孔地点とコア採取地点の全ての地点において、ひび割れ等の変状は確認できず、概ね健全であることが確認できた。



### 5.5 AE トモグラフィの結果

AE トモグラフィの結果を図-12 に示す。図より、鋼球打撃は弾性波トモグラフィの結果と速度分布傾向がおおむね一致した。一方、チェーン引きについては、破線で示す部分において 3000m/s 以下の比較的遅い速度領域がみられる。「5. 1 原波形」で示したとおり、鋼球では打撃毎に振幅が大きくシャープな波形が得られたのに対し、チェーン引きでは小さな振幅も多く含んだ複雑な波形であった。チェーン引きでは S/N 比の小さい波など、誤差を招く要因が混入している可能性が考えられる。そのため、イベント抽出閾値を高くすることや、明瞭度によるフィルタリング処理を施し、その後速度分布を算出することを試みた。

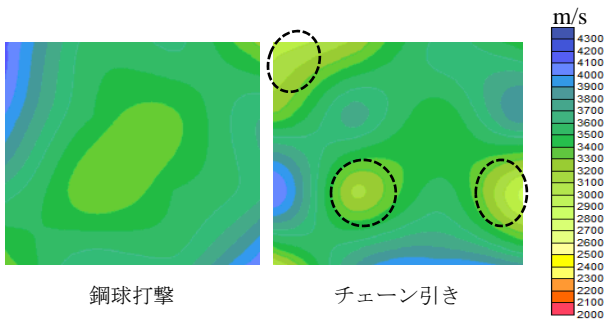


図-12 AE トモグラフィの結果

### 5.6 イベント抽出閾値と明瞭度フィルター

計測で得られた各弾性波に対し、イベント抽出閾値を変化させた場合の AE トモグラフィ結果への影響と、明瞭度によるフィルタリング効果を確認することとした。これら効果の確認は、弾性波トモグラフィの結果との比較により行うこととした。弾性波トモグラフィの結果は、発生源の位置と発信時刻が既知の条件で計測を行うため、位置標定に関する誤差が生じない。ドリル削孔やコア採取による検証結果においても、弾性波トモグラフィの結果はもっともらしい結果であるといえる。そこで、AE トモグラフィ結果の妥当性については、真の解に近いと考えられる弾性波トモグラフィとの類似性により判断することとした。AE トモグラフィの結果と弾性波トモグラフィの結果との類似性の指標を式(3)に示す  $V_{error}$  と定義することとした。i は解析モデルにおける 1~16 の要素を示しており、AE トモグラフィで得た要素 i の速度  $V_{AET}(i)$  と、それに対応する弾性波トモグラフィの要素 i の速度  $V_{EWT}(i)$  の残差を用いた。図-13 に、この残差のイメージを補足図として示した。弾性波トモグラフィと AE トモグラフィの結果が近づくと  $V_{error}$  の値が小さくなり、AE トモグラフィの解が真に近づいたと判断できる。双方の解が完全に一致した場合、 $V_{error}$  は 0 となる。

図-14、図-15 にそれぞれイベント抽出閾値、明瞭度フィルターの閾値と  $V_{error}$  との関係を示した。なお、 $V_{error}$

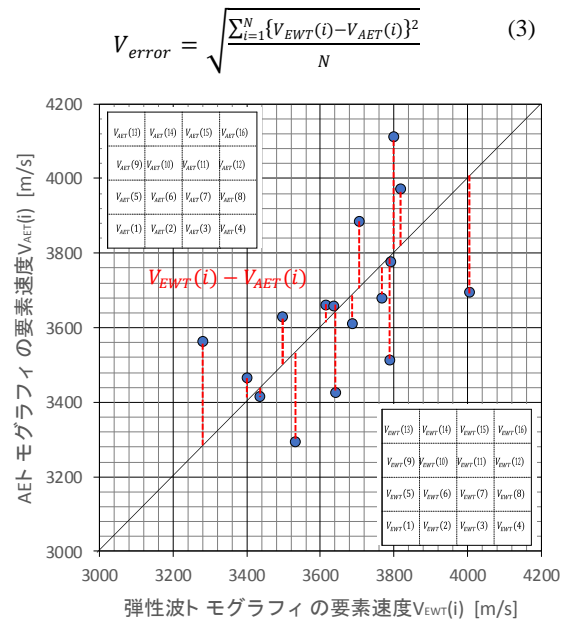


図-13  $V_{error}$  の算出に関する補足図

を得るための AE トモグラフィの解析には、いずれも同じ数のイベント (100 イベント) を用いた。これは解析の情報量を同程度としたうえで、イベント抽出閾値、明瞭度フィルターそれぞれの効果を確認するためである。結果より、鋼球打撃、チェーン引きのいずれも、イベント抽出閾値あるいは、明瞭度フィルターの値を大きくすることで  $V_{error}$  の値が小さくなり、解が真値に近づく傾向が示されている。チェーン引きについては、S/N 比の小さい波などの存在により、解の妥当性が心配されたが、イベント抽出閾値及び明瞭度フィルターにより  $V_{error}$  の値を鋼球打撃と同程度 (200m/s 付近) まで下がることが示されている。 $V_{error}$  の収束値が 200m/s 付近の値を示している理由について、AE トモグラフィの解析と弾性波トモグラフィの解析で用いたイベント数に差があること、すなわち、情報量の違いに起因する可能性や、AE トモグラフィの位置標定における誤差に起因する可能性など考えられるが、現段階では明らかではなく今後の検討課題としたい。いずれにせよ本結果より、チェーン引きでも明瞭度等による適切な処理により鋼球打撃と同等の AE トモグラフィ結果を得ることができると確認した。ここで、「5. 5 AE トモグラフィの結果」におけるチェーン引きの結果では、弾性波トモグラフィとの類似性が良好でないように見られた。これについて、イベント抽出閾値を高くして処理した結果、および明瞭度フィルターで処理した結果を図-16 に示す。いずれの結果も著しい低速度領域はみられず、弾性波トモグラフィの結果と概ね速度領域が一致し、全体的に健全であると判断できる。なお、ここではイベント抽出閾値 0.018V、明瞭度 0.14 のフィルターによる結果を例示した。

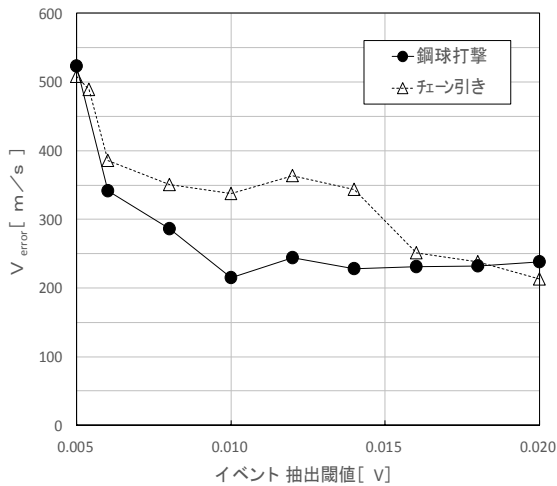


図-14 イベント抽出閾値の影響

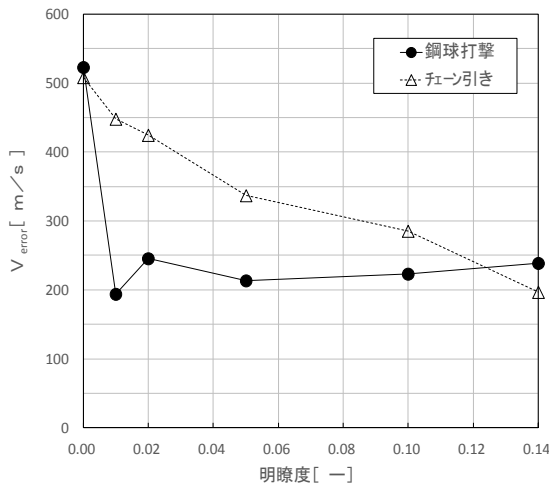


図-15 明瞭度フィルターの効果

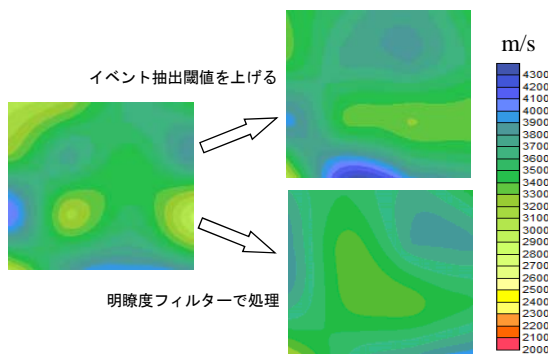


図-16 明瞭度フィルター等の効果

## 6. 結論

コンクリート床版を対象とした AE トモグラフィ解析において、鋼球打撃とチェーン引きの2種類の入力手法の比較を行った。得られた知見を以下に列挙する。

- ・鋼球打撃，チェーン引きともに振幅値と明瞭度との間には正の相関が見られた。チェーン引きでは振幅値，明瞭度ともに低い領域に分布し，双方の相関も弱い。
- ・チェーン引きは複雑な弾性波を励起することから，S/N

比の小さい波などの影響により，誤った解釈をもたらす AE トモグラフィの結果を導く可能性がある。

- ・チェーン引きは，イベント抽出閾値，明瞭度フィルターの処理により，AE トモグラフィの結果を真値に近づけることができる可能性がある。

## 謝辞

本研究を実施するにあたり，西日本高速道路株式会社の安里俊則氏には現場の諸手配をはじめ，論文作成における助言等，多大なご協力をいただいた。ここにその感謝の意を表す。なお，本研究の一部は，国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託研究業務の結果得られた成果である。

## 参考文献

- 1) Yoshikazu Kobayashi, Tomoki Shiotani: Computerized AE Tomography, Innovative AE and NDT Techniques for On-Site Measurement of Concrete and Masonry Structures, State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 239-MCM, Springer,47-68, 2016.1
- 2) 奥出信博, 塩谷智基, 桃木昌平, 小林義和 : AE トモグラフィによるインフラ構造物の健全性評価手法の提案, 日本非破壊検査協会, 第 18 回 AE 総合コンファレンス論文集, 39-42, 2011.9
- 3) Shiotani, T., Y. Kobayashi and S. Momoki: Assessment of infrastructures by means of passive and positive elastic waves approaches, Conference Proceedings of The 12<sup>th</sup> International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing-Applications of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering, pp.531-549, Keynote Lecture, 2013.9
- 4) 塩谷智基, 麻植久史, 西田孝弘, 宮田弘和 : AE 法および AE トモグラフィにより推定された実橋梁 RC 床版の損傷検証, コンクリート工学年次論文集, 2085-2090, vol.38, No.1, 2016.7
- 5) ASTM International: Standard Practice for Measuring Delaminations in Concrete Bridge Decks by Sounding, D4580-03, 2007.11
- 6) Hirotugu Akaike: Markovian representation of stochastic processes and its application to the analysis of autoregressive moving average processes, Annals of the Institute of Statistical Mathematics Vol.26, No.1, pp.363-387, 1974.3
- 7) 麻植久史, 塩谷智基, 橋本勝文, 茅野茂 : 実 RC 床版を対象とした加速度計による AE 計測システムの開発, 非破壊検査協会, 第 21 回 AE 総合コンファレンス論文集, 25-28, 2017.10